

Porras-Alvarez, J.; Duque-Vera, IL. (2023) Cardiac Autonomic Modulation and Physical Performance at the Functional Threshold Power. Revista Internacional de Medicina y Ciencias de la Actividad Física y el Deporte vol. 23 (89) pp. 388-401
<https://doi.org/10.15366/rimcafd2023.89.027>

ORIGINAL

MODULACIÓN AUTONÓMICA CARDIACA Y RENDIMIENTO FÍSICO EN EL UMBRAL DE POTENCIA FUNCIONAL

CARDIAC AUTONOMIC MODULATION AND PHYSICAL PERFORMANCE AT THE FUNCTIONAL THRESHOLD POWER

Porras-Alvarez, J.¹ y Duque-Vera, IL.²

¹ Doctorando en Ciencias Biomédicas. Universidad de Caldas. Manizales. Escuela Educación Física, Recreación y Deporte. Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia-Chiquinquirá (Colombia) javier.porras@uptc.edu.co; javier.22916218225@ucaldas.edu.co

² Doctor en Biología. Departamento de Acción Física Humana. Universidad de Caldas, Manizales (Colombia) duqueivan@ucaldas.edu.co

AGRADECIMIENTOS

Los autores expresan sus agradecimientos a las personas e instituciones que hicieron posible desarrollar esta investigación, en especial a: RUBEN DARIO BELTRAN. Entrenador Liga de ciclismo de Caldas. ANGEL YESID CAMARGO. Entrenador liga de ciclismo de Boyacá. Dra. AIDE TABORDA. Laboratorio clínico. Dr. JUAN CARLOS SEPÚLVEDA. Universidad Tecnológica de Pereira. A los Ciclistas que participaron en el estudio. Vicerrectoría de investigaciones. Universidad de Caldas. Departamento Acción Física Humana. Universidad de Caldas. Grupo de investigación FIMED-UPTC

Código UNESCO/ UNESCO code: 2411. Fisiología humana/ Human physiology

Clasificación Consejo de Europa/Council of Europe classification: 6. Fisiología del ejercicio / Exercise Physiology.

Recibido 29 de octubre 2020 **Received** October 29, 2020

Aceptado 26 de junio de 2022 **Accepted** June 26, 2022

RESUMEN

El objetivo fue establecer la relación de la modulación autonómica cardiaca con el rendimiento físico del umbral de potencia funcional ($UPF_{20.95\%}W \cdot kg^{-1}$). Participaron 29 ciclistas hombres con edad 22 ± 3 años. El rendimiento físico del $UPF_{20.95\%}W \cdot kg^{-1}$ fue 4.3 ± 0.4 . Se demostró una relación positiva del rendimiento con el índice parasimpático (PNS index) en reposo, así como con la reactividad parasimpática y la recuperación post- P_{20} , $R^2 = 0.80, 0.97, 0.96$

respectivamente, $p < 0.000$. En conclusión, los ciclistas con mayor rendimiento físico presentaron mayor actividad parasimpática en reposo. Así como mayor reactividad parasimpática y recuperación post- P_{20} . Tanto el índice parasimpático como simpático son parámetros para identificar la adaptación/desadaptación a la intensidad del entrenamiento, presencia de fatiga, monitorear y predecir el rendimiento físico de acuerdo con el umbral de potencia funcional en ciclistas de nivel competitivo. Adicionalmente, plantea un escenario para una identificación de predisposición genética a los deportes de resistencia de larga duración.

PALABRAS CLAVE: Atletas; Ciclismo; Deporte; Fisiología humana; Medicina deportiva; Sistema cardiovascular

ABSTRACT

The objective was to establish the relationship between cardiac autonomic modulation and physical performance of the functional threshold power ($FTP_{20.95\%W.kg^{-1}}$). Twenty-nine male cyclists aged 22 ± 3 years participated. The physical performance of the $FTP_{20.95\%W.kg^{-1}}$ was 4.3 ± 0.4 . A positive relationship of performance with the parasympathetic index (PNS index) at rest, as well as with parasympathetic reactivity and recovery, $R^2 = 0.80, 0.97, 0.96$ respectively, $p < 0.000$, was demonstrated. In conclusion, cyclists with higher physical performance had higher parasympathetic activity at rest. As well as greater parasympathetic reactivity and post- P_{20} recovery. Both the PNS index and the SNS index are parameters to identify adaptation/maladaptation to training intensity, presence of fatigue, monitor and predict physical performance according to functional power threshold in competitive level cyclists. Additionally, it raises a scenario for identification of genetic predisposition to long-term endurance sports.

KEY WORDS: Athlete; Autonomic Nervous System; Cardiac System; Exercise; Heart Rate Variability.

1. INTRODUCCIÓN

El rendimiento físico en ciclismo de ruta está asociado a la capacidad de mantener un esfuerzo intenso en el mayor tiempo posible, generalmente con una duración que oscila entre los ~30 minutos y las cinco horas e inclusive en competiciones que pueden durar hasta 21 días (1). La búsqueda de nuevos métodos para detectar, monitorear las respuestas y adaptaciones fisiológicas del organismo al entrenamiento se han venido desarrollando con particular intensidad. En ciclismo, los parámetros fisiológicos para monitorear, predecir el rendimiento físico y establecer zonas de entrenamiento han sido, por un lado, el $\dot{V}O_2$ max absoluto ($L \cdot \text{min}^{-1}$) y relativo ($ml \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{min}^{-1}$); la lactatemia máxima ($mmol/L^{-1}$) y el umbral del lactato ($mmol/L^{-1}$) (1–3) y por otro lado, la potencia en vatios (W) expresada en máxima, media y relativa ($W \cdot \text{kg}^{-1}$) (4–6). Estos parámetros se determinan principalmente mediante pruebas con incremento progresivo de la intensidad hasta el agotamiento, denominadas pruebas

máximas. Sin embargo, las pruebas con intensidad constante denominadas pruebas submáximas, vienen constituyéndose en la herramienta más utilizada para determinar el rendimiento físico y establecer zonas de entrenamiento, dentro de este tipo de pruebas está el test de 20 minutos (P_{20}), del cual se determina el umbral de potencia funcional (UPF) (7). De manera que el UPF expresado en la potencia media máxima (W) y la potencia media relativa ($W \cdot kg^{-1}$), son la forma actual en ciclismo de ruta para establecer el perfil de potencia, predecir el rendimiento físico y establecer zonas de entrenamiento (1).

La modulación autonómica cardiaca se realiza tanto, por mecanismos intrínsecos como extrínsecos. El control extrínseco se efectúa por el sistema nervioso autónomo (SNA) mediante actividad simpática (AcSi), que junto con el ejercicio físico aumentan los mecanismos de autorregulación cardiaca, incrementando la frecuencia cardiaca y por la actividad parasimpática (AcPa) mediante el nervio vago y como consecuencia induce una disminución de la frecuencia cardiaca. El SNA también controla la presión arterial por reflejos que se originan en los barorreceptores y los quimiorreceptores. La variabilidad de la frecuencia cardiaca (VFC) es la variación en tiempo en milisegundos entre latido y latido cardiaco. Por tanto, la evaluación de la modulación autonómica cardiaca mediante la VFC, evalúa la actividad simpática y parasimpática del SNA, la cual refleja la compleja interacción entre el SNA, el barorreflejo arterial, quimiorreflejo central y periférico, ergorreflejo, aferencias periféricas como barorreceptores, mecano y metaborreceptores (8).

En la reactivación parasimpática y recuperación después del ejercicio, los procesos autonómicos y del reflejo presor del ejercicio que participan en el aumento de la frecuencia cardiaca se producen esencialmente a la inversa, donde la eliminación del "comando central" junto con la retroalimentación eliminada de los receptores musculares, restablece el barorreflejo arterial a un nivel inferior y provoca una disminución inicial de la frecuencia cardiaca que es predominantemente mediado por un aumento en AcPa. A medida que la recuperación continúa, se produce una gradual "fase lenta", mediada tanto por la reactivación parasimpática progresiva como la retirada simpática (9). En consecuencia, la evaluación de VFC refleja la modulación autonómica cardiovascular en reposo, reactivación parasimpática y recuperación después del ejercicio (10-11).

La presente investigación se enfocó en evaluar la modulación autonómica cardiovascular mediante la VFC en los parámetros de AcPa y AcSi por el método dominio tiempo y no lineal, de acuerdo con el rendimiento físico obtenido en el UPF en ciclistas de nivel competitivo. Lo anterior, debido a que, predecir el rendimiento físico, monitorear la adaptación/desadaptación a la intensidad del entrenamiento y la presencia de fatiga en el deporte, son hoy los aspectos más importantes, tanto en la metodología del entrenamiento como para plantear la táctica en la competición. Así, nuevo conocimiento del comportamiento de la respuesta autonómica cardiovascular antes y después de la realización de una prueba submáxima, resultará de la más alta utilidad para la interpretación de fenómenos de adaptación/desadaptación al entrenamiento en ciclismo, contribuyendo a una más precisa dosificación de la intensidad del

entrenamiento y adicionalmente, a una posible identificación de predisposición genética a los deportes de resistencia de larga duración.

2. MATERIAL Y MÉTODOS

2.1. PARTICIPANTES. En este estudio participaron 29 ciclistas, 23 de ellos del departamento de Boyacá y los restantes seis del departamento de Caldas (Colombia). La potencia del estudio fue de 0.89 (12). Edad (años) 22 ± 3 ; Peso (kg) 60.0 ± 5.9 ; Talla (m) 1.7 ± 0.5 ; IMC 21 ± 1.4 ; Entrenamiento (años) 6.5 ± 3.7 .

Esta investigación está acorde con lo establecido en el artículo 11 y siguientes de la resolución 8430 de 1993, del Ministerio de Salud de Colombia. El estudio fue aprobado por el Comité de Bioética de la Facultad de Ciencias para la Salud de la Universidad de Caldas (Colombia). Los ciclistas firmaron un documento de consentimiento y de pleno conocimiento de los procedimientos que se llevaron a cabo antes, durante y después de las pruebas. Fueron instruidos para abstenerse de realizar ejercicio físico intenso, así como de consumir bebidas que contengan cafeína durante las 24 horas previas al experimento o cualquier sustancia considerada como doping. Las evaluaciones se realizaron en octubre y noviembre de 2018 y 2019 antes de la pandemia Covid-2019.

2.2. INSTRUMENTOS Y PROCEDIMIENTO. La determinación de UPF se realizó mediante una prueba contrarreloj de 20 minutos (P_{20}), según lo descrito por Allen y Coogan (7), utilizando el ergómetro Tacx Vortex® y bicicleta de propiedad del ciclista, manteniendo una cadencia de pedaleo a 90 rpm. El calentamiento fue estandarizado de acuerdo con el software Tacx. Los datos obtenidos se consignaron en archivos TCX que se procesaron en el software Power Agent®. Durante P_{20} se mantuvo un esfuerzo intenso y constante, conservando los vatios lo más alto posible, por lo cual se motivó verbalmente a los participantes en los últimos minutos. El UPF se determinó de acuerdo con lo descrito por Allen y Coggan (7).

La modulación autonómica cardiovascular se avaluó mediante la VFC antes y después de P_{20} . La evaluación en reposo se realizó en ayunas entre las 6:00 a.m. y las 8:00 a.m. en laboratorio clínico simulando en lo posible, las mismas condiciones ambientales para todos los participantes. Esta medición se realizó en reposo durante 5 minutos, luego de permanecer 10 minutos en posición decúbito supino. En recuperación se midió en sedestación pedaleando sobre la bicicleta durante 5 minutos (recuperación activa), todo con instrucción de respiración espontánea. Los datos fueron obtenidos mediante el registro del latido a latido cardiaco, utilizando el monitor RS800CX Polar (13), cuyo sensor fue situado a nivel de la 5-6 costilla, alrededor de la caja torácica. Estos datos fueron procesados en el software Kubios (University of Kuopio, Finland. ver. Standard. 3.4.3), que permitió el análisis de los parámetros dominio tiempo SDNN (ms), RMSSD (ms) e índice AcPa y AcSi. Así mismo, parámetros no lineales del diagrama de Poincaré SD1, SD2 y SD1/SD2.

2.3. ANÁLISIS ESTADÍSTICO. Los datos descriptivos se expresan en promedio y desviación estándar (DE). Se hizo uso de regresión lineal simple para establecer la relación entre la VFC con el UPF. El modelo sin intercepto ($y = \beta_1 x + \varepsilon$) de la regresión lineal simple, fue el modelo que mejor se ajustó a los datos en cada una de las variables del estudio, previa aplicación de criterios de comparación como: estimación del coeficiente más significativo; menor residual estandarizado; el mayor valor del coeficiente de determinación R^2 y R^2 ajustado; menor AIC, Menor BIC; menor valor C_p de Mallows.

3. RESULTADOS

3.1. Valores Umbral de Potencia Funcional. La potencia media absoluta $UPF_{20.95\%W}$ fue 267.8 ± 34.6 W y la potencia media relativa $UPF_{20.95\%W \cdot kg^{-1}}$ fue de 4.2 ± 0.5 W·kg⁻¹, correspondiente a la quinta categoría de clasificación “muy buena”, de las ocho categorías propuestas por Allen y Coggan.

3.2. VFC en Reposo, Reactividad Parasimpática y Recuperación post-P₂₀. AcPa y AcSi fueron analizadas mediante la VFC por métodos de dominio tiempo y no lineal (Tabla 1).

Tabla 1. AcPa y AcSi en Reposo, Reactividad Parasimpática y Recuperación. Dominio Tiempo y no Lineal

AcPa y AcSi	Reposo	Reactividad Post-P ₂₀	Recuperación Post-P ₂₀
Mean RR (ms)	1159.33±168.74	406.61±31.41	433.59±33.8
SDNN (ms)	65.96±25.79	4.71±1.51	5.07±1.55
√RMSSD (ms)	80.73±38.32	4.72±2.2	5.04±2.41
SD1 (ms)	59.73±26.06	3.34±1.56	3.56±1.7
PNS index	2.27±1.26	-4±0.33	-3.77±0.37
AcSi			
Mean HR (beats/min)	52.8±7.57	148.39±11.13	139.18±10.66
Stress index	6.8±2.81	60.45±16.09	52.55±13.29
SD2 (ms)	72.82±26.73	5.65±1.86	6.11±1.79
SNS index	-1.33±0.66	15.96±3.85	13.5±3.29

Nota. Mean RR: media de los intervalos entre latidos cardiacos; SDNN: Desviación estándar de todos los intervalos entre latidos cardiacos. √RMSSD: Raíz cuadrada del valor medio de las diferencias entre los latidos cardiacos sucesivos; SD1: desviación estándar 1 del diagrama de Poicare; PNS index: índice del sistema nervioso parasimpático; ms: milisegundos; Mean HR (beats/min): media de la frecuencia cardiaca en latidos por minuto; Stress index: Índice de estrés; SD2: desviación estándar 2 del diagrama de Poicare; SNS index: Índice del sistema nervioso simpático.

3.3. Relación AcPa con $UPF_{20.95\%W}$ y $UPF_{20.95\%W \cdot kg^{-1}}$. Existió una relación positiva de AcPa en reposo con el rendimiento físico de $UPF_{20.95\%W}$ y con el $UPF_{20.95\%W \cdot kg^{-1}}$. Existió una relación negativa de AcSi en reposo con el rendimiento físico de $UPF_{20.95\%W}$ y del $UPF_{20.95\%W \cdot kg^{-1}}$ (Tabla 2).

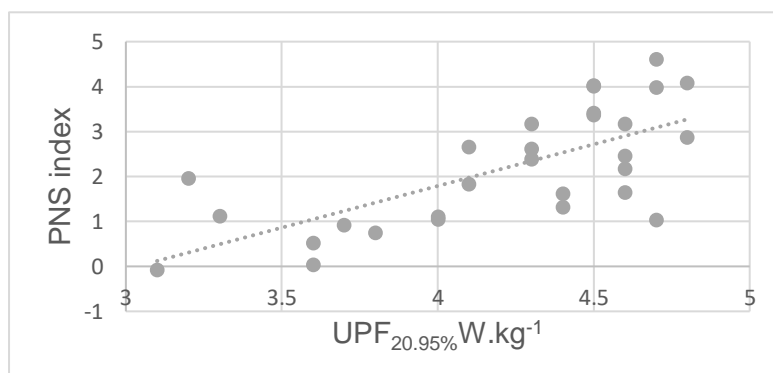
Tabla 2. Regresión AcPa y AcSi con $UPF_{20.95\%W}$ y $UPF_{20.95\%W.kg^{-1}}$

AcPa y AcSi	$UPF_{20.95\%W}$		$UPF_{20.95\%W.kg^{-1}}$	
	Sig	R ²	sig	R ²
SDNN (ms)	0.000	0.89	0.000*	0.91
√RMSSD (ms)	0.000	0.85	0.000*	0.87
SD1 (ms)	0.000*	0.87	0.000*	0.86
PNS index	0.000*	0.82	0.000*	0.80
AcSi				
SNS index:	0.000*	-0.86	0.000*	-0.86

Nota. SDNN: Desviación estándar de todos los intervalos entre latidos cardiacos. √RMSSD: Raíz cuadrada del valor medio de las diferencias entre los latidos cardiacos sucesivos; SD1: desviación estándar 1 del diagrama de Poicare; PNS index: índice del sistema nervioso parasimpático; ms: milisegundos. *: este símbolo representa una relación significativa. Sig: nivel de significancia; AcSi: Actividad simpática; SNS index: Índice del sistema nervioso simpático; -: este signo significa una relación negativa.

3.4. Índice AcPa y $UPF_{20.95\%W.kg^{-1}}$. El índice del sistema nervioso parasimpático, mostro una relación significativa con el rendimiento físico en el $UPF_{20.95\%W.kg^{-1}}$. Esta relación fue realizada en reposo, en posición decúbito supino, respirando espontáneamente (**Figura 1**).

Figura 1. Índice AcPa y $UPF_{20.95\%W.kg^{-1}}$



Nota. Los ciclistas con mayor AcPa en reposo, en posición decúbito supino, respirando espontáneamente, presentaron un mayor rendimiento físico en el $UPF_{20.95\%W.kg^{-1}}$, $R^2 = 0.80$, $p = 0.000$. Regresión lineal simple, modelo sin intercepto.

3.5. Relación Reactividad Parasimpática y Recuperación con el $UPF_{20.95\%W.kg^{-1}}$. Existió una relación significativa positiva entre el índice de AcPa tanto en la reactividad parasimpática como la recuperación con el rendimiento físico en el $UPF_{20.95\%W.kg^{-1}}$, al igual que en los demás parámetros de la VFC. De igual forma se observó diferencia significativa pero negativa de AcSi tanto en Reactividad parasimpática como en la recuperación (**Tabla 3**).

Tabla 3. Reactividad Parasimpática y Recuperación AcPa y AcSi con el $UPF_{20.95\%W \cdot kg^{-1}}$

AcPa y AcSi	Reactividad Parasimpática $UPF_{20.95\%W \cdot kg^{-1}}$		Recuperación $UPF_{20.95\%W \cdot kg^{-1}}$	
	Sig.	R ²	Sig.	R ²
SDNN (ms)	0.000*	0.89	0.000*	0.91
√RMSSD (ms)	0.000*	0.81	0.000*	0.91
SD1 (ms)	0.000*	0.81	0.000*	0.92
PNS index	0.000*	0.97	0.000*	0.96
SNS index	0.000*	-0.92	0.000*	-0.92

Nota. SDNN: Desviación estándar de todos los intervalos entre latidos cardiacos. √RMSSD: Raíz cuadrada del valor medio de las diferencias entre los latidos cardiacos sucesivos; SD1: desviación estándar 1 del diagrama de Poicare; PNS index: índice del sistema nervioso parasimpático; SNS index: índice del sistema nervioso simpático; ms: milisegundos; *: este símbolo representa una relación significativa; -: este signo significa una relación negativa.

4. DISCUSIÓN

4.1. Umbral de Potencia Funcional. El UPF expresado de forma absoluta en $UPF_{20.95\%W}$ (4–6), se presenta como un parámetro para establecer siete zonas de entrenamiento (7). De acuerdo con el resultado del $UPF_{20.95\%W}$, se determinan porcentajes desde el 50% al 150%, asociados a siete zonas de entrenamiento (7). Estas zonas buscan desarrollar y mantener las capacidades físicas, pero son el $\dot{V}O_2\max$ y lactatemia los parámetros clásicos para establecer zonas de entrenamiento (1–3). Al respecto, Borszcz y cols (2018) (14) encontraron una correlación de $R = 0.81$ entre $UPF_{20.95\%W}$ y el $\dot{V}O_2\max$ absoluto ($L \cdot \min^{-1}$), 236 ± 38 vatios relacionado a $3.5 \pm 0.6 L \cdot \min^{-1}$, estudio realizado en 23 ciclistas entrenados.

De acuerdo con la metodología de medición de lactatemia, el estudio de Inglis y cols (2019) encontraron una correlación de $R = 0.96$ entre $UPF_{20.95\%W}$ y el máximo estado estable del lactato (MLSS) (261 ± 45 comparado con 243 ± 45 vatios). No obstante, el $UPF_{20.95\%W}$ no presentó buena sensibilidad a los cambios inducidos por 7 meses de entrenamiento. Por tanto, no se recomienda utilizarlo como una representación del máximo estado estable del lactato. En cambio, el estudio de Borszcz y cols (2018) (15) halló una relación de $R^2 = 0.81$, $UPF_{20.95\%W}$ de 251.7 ± 26.3 asociado a 248.3 ± 25 vatios, correspondiente a un máximo estado estable del lactato de $4.1 \pm 1 \text{ mmol/L}^{-1}$. Los autores concluyen que el $UPF_{20.95\%W}$ es una alternativa al MLSS, tanto en ciclistas entrenados como bien entrenados. El estudio de Borszcz y cols (2018) (14) encontró una correlación de $R = 0.61$ entre el $UPF_{20.95\%W}$ con el umbral anaeróbico individual (236 ± 38 vatios relacionado a $2.7 \pm 0.5 \text{ mmol/L}^{-1}$).

Los anteriores estudios muestran que el $\dot{V}O_2\text{max}$ ($\text{L}\cdot\text{min}^{-1}$), la lactatemia y el $\text{UPF}_{20.95\%W}$, se correlacionan. No obstante, estos parámetros se deben aplicar de forma individual y son medidas independientes para evaluar y predecir el rendimiento físico. Además, se debe tener precaución al predecir la concentración de lactato únicamente por el $\text{UPF}_{20.95\%W}$, ya que puede sobreestimar el umbral de concentración de lactato en las diferentes metodologías, porque la correlación es correspondiente con el nivel de formación. Por otra parte, estos estudios proponen para diferentes niveles de formación, no restar el 5% o restar un 8% o un 10% de los vatios a la hora de determinar el UPF.

El UPF expresado de forma relativa $\text{UPF}_{20.95\%W}\cdot\text{kg}^{-1}$ (4–6) se presenta como parámetro alternativo para monitorear y predecir el rendimiento físico. Sin embargo, en ciclismo son el $\dot{V}O_2\text{max}$ absoluto ($\text{L}\cdot\text{min}^{-1}$) y relativo ($\text{ml}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{min}^{-1}$), lactatemia máxima en estado estable, umbral del lactato, umbral anaeróbico individual, umbral de $4\text{mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ y umbral de lactato (1–3) los parámetros para monitorear y predecir el rendimiento físico. Al respecto, el estudio de Denham y cols (2017) halló una correlación de $R = 0.93$, $\text{UPF}_{20.95\%W}\cdot\text{kg}^{-1}$ de 2.62 ± 0.75 comparado con la potencia máxima de 305.5 ± 65.4 vatios, asociado a un $\dot{V}O_2\text{max}$ relativo de 46.8 ± 9.1 $\text{ml}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{min}^{-1}$, $R^2 = 0.80$, considerándose el rendimiento físico del $\text{UPF}_{20.95\%W}\cdot\text{kg}^{-1}$ predictor de la potencia máxima (16).

La categorización del rendimiento deportivo en ciclismo de acuerdo con el perfil de potencia expresado en $\text{UPF}_{20.95\%W}\cdot\text{kg}^{-1}$, se presenta en ocho categorías. Estas categorías fueron establecidas por Allen y Coggan (7), de acuerdo con los resultados de evaluaciones sistemáticas a cientos de ciclistas de diferentes niveles de formación, durante más de 10 años de experiencia de entrenamiento en ciclismo (7). En este sentido, el rendimiento físico de los ciclistas del estudio de Denham y cols (2017) correspondió a “Moderado”, $\text{UPF}_{20.95\%W}\cdot\text{kg}^{-1}$ de 2.62 ± 0.75 (16); en el estudio de Niño y Leguizamo (2019) fue $\text{UPF}_{20.95\%W}\cdot\text{kg}^{-1}$ 4.5, correspondiente a la categoría “Muy buena” (17); el de Sanders y cols (2017) fue $\text{UPF}_{20.95\%W}\cdot\text{kg}^{-1}$ de 4.7, correspondiente a la categoría “Muy buena” (18); el de Borszcz del 2018 fue $\text{UPF}_{20.95\%W}\cdot\text{kg}^{-1}$ de 3.1, correspondiente a la categoría “Moderado” (14) y el del 2019, $\text{UPF}_{20.95\%W}\cdot\text{kg}^{-1}$ fue de 3.4 ± 0.3 (15), correspondiente a la categoría “Moderado”; el de Valenzuela y cols (2018) (19) el $\text{UPF}_{20.95\%W}\cdot\text{kg}^{-1}$ fue de 3.39 ± 0.62 , la categoría de clasificación correspondió a “Moderado”. Los resultados de los seis anteriores estudios muestran que la clasificación de los ciclistas evaluados de acuerdo con el perfil de potencia está en dos categorías, Moderado y Muy Buena. A pesar de los pocos estudios realizados en esta forma de categorización, que ilustren el rendimiento físico actual de los ciclistas, el $\text{UPF}_{20.95\%W}\cdot\text{kg}^{-1}$, es un parámetro promisorio guía de clasificación y monitoreo del rendimiento físico. Sin embargo, está por demostrarse la relación en estas y el rango de $W\cdot\text{kg}$ en cada una de ellas, con los parámetros estándar como el $\dot{V}O_2\text{max}$ y lactatemia, además de la relación con las cinco categorías propuestas por De-Pauw, 2013 (3).

El rendimiento físico en el $\text{UPF}_{20.95\%W}\cdot\text{kg}^{-1}$ permite en la parte metodológica asociar el término, altamente entrenado, bien entrenado, profesionales, de nivel competitivo, de nivel recreativo, de alto rendimiento, de clase mundial y altamente experimentados a un valor de $W\cdot\text{kg}$. En la práctica, tanto para ciclistas como para profesionales de ciencias del deporte, se convierte en un

parámetro alternativo al $\dot{V}O_2\text{max}$ y lactatemia para monitorear el rendimiento físico y establecer los objetivos a corto, mediano y largo plazo. Adicionalmente, las pruebas submáximas se vienen convirtiendo en la herramienta más utilizada en la preparación de los ciclistas.

4.2. AcPa en Reposo

SDNN (ms). Este parámetro está asociado con AcPa, en el presente estudio fue de 65.96 ± 25.79 ms, en los siguientes cuatro estudios, cuya población fueron ciclistas SDNN fue: 75.95 ± 15.41 ms (20); 79.6 ± 32.2 ms (21); 57.2 ± 20.9 ms (22) y 59.10 ± 6.52 ms (23). De acuerdo con lo anterior, los valores promedio y DE para el índice SDNN, correspondiente a ciclistas con diferentes niveles de formación oscilan entre 68.50 ± 0.90 ms. En nadadores se observa valores de 75.6 ms (24), en corredores y triatletas valores de 80 ms (22,25).

RMSSD (ms). Es indicador de AcPa, en el presente estudio fue 80.73 ± 38.32 ms; en el estudio de Earnest (2004), donde participaron ocho ciclistas que estaban compitiendo en la vuelta España 2001, los registros fueron obtenidos el primer día de competencia, el valor fue 44.89 ± 5.21 (ms) (23); en el estudio Arslan y Aras (2016) (22) en el que participaron seis ciclistas de Turquía (experiencia 9.7 ± 4.8 años), los registros fueron obtenidos después de dos semanas de entrenamiento aerobio, en periodo preparatorio, este índice correspondió a 42.2 ± 24.2 (ms) (22); en el estudio de Oliveira-Silva (2018) (20) participaron 12 ciclistas de Brasil, los registros fueron obtenidos un día antes de la competición y fue de 59.93 ± 18.70 (ms). De acuerdo con los anteriores estudios, el valor promedio para ciclistas en RMSSD (ms) es 59.01 ± 22.79 ms, para nadadores se ha observado valores de 71.4 ± 46.92 ms (26), para corredores y triatletas valores de 72.16 ± 39.20 ms (25,27–31) y para esquiadores de 98.15 ± 61.6 ms (32).

SD1 (ms). Es indicador de AcPa, SD1 del diagrama de Poincaré, en el presente estudio fue de 59.73 ± 26.06 , en el estudio de Oliveira-Silva (2018) (20) en ciclistas fue 52.60 ± 19.38 , en triatletas este parámetro fue de 73 ± 48 (25) y en corredores de 34.34 ± 15.18 (25).

PSN index. En el presente estudio el índice AcPa (PSN index) fue 2.3 ± 1.3 , este índice es el referente a utilizar para observar los cambios de acuerdo con el periodo o mesociclo de entrenamiento y el nivel de formación de los ciclistas. Sin embargo, se ha informado que los programas de entrenamiento influyen de manera diferente sobre AcPa, evaluada en reposo de cúbito supino (33).

Todos los participantes de los estudios mencionados anteriormente hacen parte del deporte clasificado como de resistencia de larga duración, no obstante, se observan diferencias en los valores de SDNN (ms), RMSSD (ms) y SD1 (ms) entre los estudios, lo que incide en el índice AcPa (PNS Index), porque el PNS index es dependiente de los valores de estos parámetros. De manera que, este corresponde a cada disciplina deportiva y es dependiente del nivel de formación de los atletas. Sin embargo, este es el parámetro a utilizar en la parte práctica, para una precisa dosificación de la intensidad del

entrenamiento, valoración del rendimiento físico y adaptación a las cargas de entrenamiento, en deportes de resistencia de larga duración como el ciclismo de ruta, el cual indica y refleja el tono vagal cardíaco.

SNS index. Este índice AcSi (SNS index) en el presente estudio fue de -1.3 ± 0.7 , un valor del SNS index de cero significa que los tres parámetros que reflejan la actividad simpática (Mean HR (beats/min), Stress index, SD2 (ms)) son, en promedio, iguales a la media de la población normal. Por su parte, un valor positivo del índice AcSi indica cuántas desviaciones estándar por encima de la media de la población normal están los valores de los parámetros y un valor negativo indica cuántas desviaciones estándar por debajo de la media de la población normal están los valores de los parámetros. Por tanto, SNS index es un indicador alternativo a la capacidad cardiorrespiratoria y lactatemia máxima para identificar la adaptación/desadaptación a la intensidad del entrenamiento y la presencia de fatiga post entrenamiento o competición en ciclismo de ruta.

4.3. AcPa en Reactividad Parasimpática y Recuperación. Los ciclistas con mayor rendimiento físico en el $UPF_{20.95\%W \cdot kg^{-1}}$ presentaron una mayor reactividad parasimpática y recuperación post- P_{20} en el índice AcPa (PNS index), R^2 de 0.97 y 0.96 respectivamente. En el presente estudio se evaluó la recuperación de forma activa pedaleando sobre la bicicleta, se debe considerar que la posición del cuerpo afectan las medidas de AcPa, con una postura más erguida como estar sentado o de pie, la recuperación es más lenta en comparación con la posición decúbito supino (34–36). Por otra parte, en atletas la recuperación post ejercicio es caminando o pedaleando según sea la actividad realizada, es decir, recuperación activa, ya que, comúnmente esta se evalúa con la persona en condición pasiva (decúbito supino o sentado) (21,37–39).

La evaluación de AcPa post ejercicio, sobre todo los primeros 10 minutos de recuperación, es un parámetro que se utiliza para detectar adaptaciones a la intensidad del entrenamiento (40–43). Además, la monitorización diaria del entrenamiento y la competición, permite por un lado estructurar los microciclos de entrenamiento con referencia a la cinética de recuperación parasimpática cardíaca (11) y por otro en carreras de una, dos o tres semanas, brinda orientaciones para idear la estrategia a los gregarios y definir los ataques al líder del equipo. Por tanto, AcPa es un indicador alternativo a la capacidad cardiorrespiratoria y lactatemia máxima para monitorear el rendimiento físico en ciclistas de nivel competitivo.

4.4. Relación AcPa con el $UPF_{20.95\%W \cdot kg^{-1}}$. En reposo AcPa refleja el tono vagal cardíaco de las personas. Este se puede mejorar con la realización de ejercicio físico regular. Se observan cambios tan solo en seis semanas de entrenamiento (33), pero es el entrenamiento de resistencia de larga duración el que ocasiona un aumento significativo en el tono vagal cardíaco. Consecuentemente, AcPa es mayor en atletas comparado con no atletas (43). En el presente estudio, los ciclistas con mayor AcPa en reposo presentaron mayor rendimiento tanto en el $UPF_{20.95\%W}$ como en el $UPF_{20.95\%W \cdot kg^{-1}}$. El R^2 entre el índice de AcPa (PNS index) y $UPF_{20.95\%W \cdot kg^{-1}}$ fue de 0.80, lo que

significa el 80% del rendimiento físico es explicado por AcPa. De acuerdo con lo anterior, AcPa se convierte en un indicador alternativo a la capacidad cardiorrespiratoria y lactatemia máxima para predecir el rendimiento físico en ciclistas de nivel competitivo. Sin embargo, en estudios ulteriores se debe tener en cuenta variables como temperatura ambiente, proceso de entrenamiento (33), nivel de formación de los ciclistas, especialidad dentro del equipo, horas de sueño en la noche y dos noches anteriores, nivel de estrés del día anterior y en el momento de la prueba (44) y altura donde viven los ciclistas (45), que influyen en las medidas de los parámetros de la VFC.

La relación significativa entre AcPa en reposo con el $UPF_{20.95\%W \cdot kg^{-1}}$ indica la participación del SNA en el rendimiento físico. En este sentido, Machhada y cols (2017) (46) mostraron la primera evidencia que AcPa generada por un circuito del SNC determina la capacidad de hacer ejercicio, en un estudio realizado en animales (ratones machos). En seres humanos, la primera evidencia de una relación causal AcPa y rendimiento físico, fue presentada por Verweij, Vegte y van de Harst (2018) (47), de acuerdo con un estudio genético (en el genoma completo encontraron 25 polimorfismos de nucleótido único del cromosoma 23), encontraron 25 polimorfismos de nucleótido único vinculados con el rol del SNA en la modulación de la frecuencia cardíaca, esta modulación relacionada con los índices SDNN (ms) y RMSSD (ms) ($R =$ desde 0.42 hasta 0.60), parámetros determinados durante el ejercicio y recuperación. De acuerdo con los resultados del presente y de los anteriores estudios se puede inferir que la actividad parasimpática resulta útil para identificar una posible predisposición genética a los deportes de resistencia de larga duración como el ciclismo de ruta. Además, los datos del presente estudio apoyan lo propuesto por Gourine y Ackland (2019) (48), que indican que la actividad vagal cardíaca determina causalmente la capacidad para hacer ejercicio, de ahí que un alto tono vagal cardíaco en atletas de élite, es críticamente importante para conferir mayor tolerancia a la intensidad del entrenamiento, esenciales para lograr un superior rendimiento atlético.

5. CONCLUSIONES

Los ciclistas con mayor actividad parasimpática en reposo presentaron mayor rendimiento físico en el $UPF_{20.95\%W \cdot kg^{-1}}$. Los ciclistas con mayor reactividad parasimpática y recuperación de AcPa post- P_{20} presentaron mayor rendimiento físico en el $UPF_{20.95\%W \cdot kg^{-1}}$. Los índices AcPa y AcSi son parámetros para identificar la adaptación/desadaptación a la intensidad del entrenamiento, presencia de fatiga, monitorear y predecir el rendimiento físico de acuerdo con el UPF en ciclistas de nivel competitivo. Adicionalmente, la AcPa plantea un escenario para una identificación de predisposición genética a los deportes de resistencia de larga duración.

6. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Faria EW, Parker DL, Faria IE. The science of cycling: Physiology and training - Part 1. *Sport Med.* 2005;35(4):285–312.
2. Beneke R. Methodological aspects of maximal lactate steady state—

- implications for performance testing. *Eur J Appl Physiol*. 2003;89(1):95–9.
3. De Pauw K, Roelands B, Cheung SS, De Geus B, Rietjens G, Meeusen R. Guidelines to classify subject groups in sport-science research. Vol. 8, *International Journal of Sports Physiology and Performance*. Human Kinetics Publishers Inc.; 2013. p. 111–22.
 4. Ebert T, Martin D, Stephens B. Power output during a professional men's road-cycling tour. *Int J Sports Physiol Perform*. 2006;1(4):324–35.
 5. Passfield L, Hopker J, Jobson S, Friel D, Zabala M. Knowledge is power: Issues of measuring training and performance in cycling. *J Sports Sci*. 2017 Jul 18;35(14):1426–34.
 6. Pinot J, Grappe F. The record power profile to assess performance in elite cyclists. *Int J Sport*. 2011;32(11):839–44.
 7. Allen H, Coggan A. *Entrenar y correr con potenciómetro*. 4th ed. España; 2018. 443 p.
 8. Belli J, Bacal F, Bocchi E. Comportamento do ergorreflexo na insuficiência cardíaca. *Arq Bras*. 2011.
 9. White DW, Raven PB. Autonomic neural control of heart rate during dynamic exercise: Revisited. Vol. 592, *Journal of Physiology*. Blackwell Publishing Ltd; 2014. p. 2491–500.
 10. Dong J. The role of heart rate variability in sports physiology. *Exp Ther Med*. 2016;11(5):1531–6.
 11. Javaloyes A, Sarabia JM, Lamberts RP, Plews D, Moya-Ramon M. Training Prescription Guided by Heart Rate Variability Vs. Block Periodization in Well-Trained Cyclists. *J Strength Cond Res*. 2020 Jun 1;34(6):1511–8.
 12. Kang H. Sample size determination and power analysis using the G*Power software. *J Educ Eval Health Prof*. 2021;18.
 13. Gameli FX, Berthoin S, Bosquet L. Validity of the Polar S810 Heart Rate Monitor to Measure R-R Intervals at Rest. *Med Sci Sport Exerc*. 2006 May;38(5):887–93.
 14. Borszcz F, Tramontin A, Bossi A, Carminatti L, Costa V. Functional Threshold Power in Cyclists: Validity of the Concept and Physiological Responses. *Int J Sports Med*. 2018 Oct 25;39(10):737–42.
 15. Borszcz FK, Tramontin AF, Costa VP. Is the functional threshold power interchangeable with the maximal lactate steady state in trained cyclists? *Int J Sports Physiol Perform*. 2019 Sep 1;14(8):1029–35.
 16. Denham J, Scott-Hamilton J, Hagstrom AD, Gray AJ. Cycling Power Outputs Predict Functional Threshold Power And Maximum Oxygen Uptake. *J Strength Cond Res*. 2017 Sep;1.
 17. Niño W, Leguizamo J. Correlación entre el Umbral Funcional de Potencia y el Umbral de Lactato en los ciclistas del equipo élite “Boyacá es para vivirla.” Tesis maestría en Pedagogía de la cultura Física. Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia; 2019.
 18. Sanders D, Taylor RJ, Myers T, Akubat I. A field-based cycling test to assess predictors of endurance performance and establishing training zones. *J Strength Cond Res*. 2017 Mar;1.
 19. Valenzuela P, Morales J, Foster C, Lucia A, de la Villa P. Is the functional threshold power a valid surrogate of the lactate threshold? *J Sport*. 2018.
 20. Oliveira-Silva I, Silva VA, Cunha RM, Foster C. Autonomic changes

- induced by precompetitive stress in cyclists in relation to physical fitness and anxiety. *PLoS One*. 2018 Dec 1;13(12).
21. Borges NR, Reaburn PR, Doering TM, Argus CK, Driller MW. Autonomic cardiovascular modulation in masters and young cyclists following high-intensity interval training. *Clin Auton Res*. 2017 Apr 1;27(2):83–90.
 22. Arslan E, Aras D. Comparison of body composition, heart rate variability, aerobic and anaerobic performance between competitive cyclists and triathletes. *J Phys Ther Sci*. 2016;28(4):1325-1329.
 23. Earnest CP, Jurca R, Church TS, Chicharro JL, Hoyos J. Relation between physical exertion and heart rate variability characteristics in professional cyclists during the Tour of Spain. *Br J Sport Med*. 2004;38:568–75.
 24. Scorcine C, Madureira F, Freitas C, Pereira R, Couto A, Kayamori J, et al. Classification of Heart Rate Variability in Swimming. *J Exerc Physiol Online*. 2019;22(5):157–64.
 25. Saboul D, Bernard C, Lyon U, Hautier CA, Pialoux V, Hautier C. The impact of breathing on HRV measurements: Implications for the longitudinal follow-up of athletes. *Eur J Sport Sci*. 2013 Sep;13(5):534–42.
 26. Palak K, Furgała A, Ciesielczyk K, Szyguła Z, Thor PJ. The changes of heart rate variability in response to deep breathing in professional swimmers. *Folia Medica Cracoviensia*. 2013;LIII:43–52.
 27. Abad CCC, Do Nascimento AM, Gil S, Kobal R, Loturco I, Nakamura FY, et al. Cardiac autonomic control in high level brazilian power and endurance track-and-field athletes. *Int J Sports Med*. 2014;35(9):772–8.
 28. Berkoff D, Cairns C, Sanchez L, Moorman III C. Heart rate variability in elite American track-and-field athletes. *J strength Cond Res*. 2007;21(1):227.
 29. Bonaduce D, Petretta M, Cavallaro V, Apicella C, Ianniciello A, Romano M, et al. Intensive training and cardiac autonomic control in high level athletes. *Med Sci Sports Exerc*. 1998;30(5):691–6.
 30. Marocolo M, Nadal J, Benchimol-Barbosa PR. The effect of an aerobic training program on the electrical remodeling of the heart: high-frequency components of the signal-averaged electrocardiogram are. *Brazilian J Med Biol Res*. 2007;40(2):199–2008.
 31. Molina G, Porto L, Fontana K, Junqueira L. Unaltered R–R interval variability and bradycardia in cyclists as compared with non-athletes. *Clin Auton Res*. 2013;23(3):141–8.
 32. Schäfer D, Gjerdalen GF, Solberg EE, Khokhlova M, Badtieva V, Herzig D, et al. Sex differences in heart rate variability: a longitudinal. *Eur J Appl Physiol*. 2015;115(10):2107–14.
 33. Kingsley JD, Figueroa A. Acute and training effects of resistance exercise. *Clin Physiol Funct Imaging*. 2016;36(3):179–87.
 34. Flatt AA, Globensky L, Bass E, Sapp BL, Riemann BL. Heart Rate Variability, Neuromuscular and Perceptual Recovery Following Resistance Training. *Sports*. 2019 Oct 18;7(10):225.
 35. Buchheit M, Al Haddad H, Laursen PB, Ahmaidi S. Effect of body posture on postexercise parasympathetic reactivation in men. *Exp Physiol*. 2009;94(7):795–804.

36. Barak O, Jakovljevic D, Gacesa J. Heart rate variability before and after cycle exercise in relation to different body positions. *J Sport*. 2010.
37. Al Haddad H, Laursen PB, Chollet D, Ahmaidi S, Buchheit M. Reliability of resting and postexercise heart rate measures. *Int J Sports Med*. 2011;32(8):598–605.
38. Boulosa DA, Barros ES, Del Rosso S, Nakamura FY, Leicht AS. Reliability of heart rate measures during walking before and after running maximal efforts. *Int J Sports Med*. 2014;35(12):999–1005.
39. Schäfer D, Olstad BH, Wilhelm M. Can Heart Rate Variability Segment Length During Orthostatic Test Be Reduced To 2 Min? *Med Sci Sport Exerc*. 2015 May;47:48.
40. Ahmadian M, Dabidi Roshan V. Heart rate recovery following arm cranking is positively associated with resting heart rate variability in children. *Sport Sci Health*. 2015 Dec 5;11(2):153–7.
41. Bellenger CR, Fuller JT, Thomson RL, Davison K, Robertson EY, Buckley JD. Monitoring Athletic Training Status Through Autonomic Heart Rate Regulation: A Systematic Review and Meta-Analysis. *Sport Med*. 2016 Oct 1;46(10):1461–86.
42. Miranda-Mendoza J, Reynoso-Sánchez LF, Hoyos-Flores JR, Quezada-Chacón JT, Naranjo J, Rangel-Colmenero B, et al. Stress score y LnrRMSSD como parámetros de carga interna durante una competición. *revistas.uam.es*. 2020;20(77):21–35.
43. Stanley J, Peake JM, Buchheit M. Cardiac parasympathetic reactivation following exercise: Implications for training prescription. Vol. 43, *Sports Medicine*. 2013. p. 1259–77.
44. Oliveira AB, Bachi ALL, Ribeiro RT, Mello MT, Vaisberg M, Peres MFP. Exercise-Induced Change in Plasma IL-12p70 Is Linked to Migraine Prevention and Anxiolytic Effects in Treatment-Naïve Women: A Randomized Controlled Trial. *Neuroimmunomodulation*. 2017 May 1;24(6):293–9.
45. Povea C, Schmitt L. Effects of Intermittent Hypoxia on Heart Rate Variability during Rest and Exercise Hypoxic Training View project Heart Rate variability In sports and physical Activity View project. *Artic High Alt Med Biol*. 2005 Sep;6(3):215–25.
46. Machhada A, Trapp S, Marina N, Stephens RC, Whittle J, Lythgoe MF, et al. Vagal determinants of exercise capacity. *Nat Commun*. 2017;8(1):1–7.
47. Verweij N, Vegte Y, van de Harst P. Genetic study links components of the autonomous nervous system to heart-rate profile during exercise. *Nat Commun*. 2018;9(1):1–9.
48. Gourine A V., Ackland GL. Cardiac vagus and exercise. Vol. 34, *Physiology*. American Physiological Society; 2019. p. 71–80.